

平成 21 年 5 月 25 日現在

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18540431

研究課題名（和文）火星の全球ダストストームに関する研究

研究課題名（英文）Study on the global dust storm in the Martian atmosphere

研究代表者

高橋 正明 (TAKAHASHI MASAOKI)

東京大学・気候システム研究センター・教授

研究者番号：70188051

研究成果の概要：

地球大気の大気大循環モデルをベースにして、火星ダストの巻き上げ、およびダスト輸送を陽に表現する火星大気モデルを作成し、ダストストーム発生に関しての問題を考察し、定性的に再現可能な大気モデルを作成した。また、火星大気に生起するいくつかの現象である、傾圧波動性擾乱、火星大気における北極振動、赤道域成層圏における半年周期振動の問題を研究した。地球大気との様々な違いを示し、いくつかの興味ある結果を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000	0	1,100,000
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	690,000	4,090,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・ 気象・海洋物理・陸水学

キーワード：火星大気 ダスト 風応力 顕熱フラックス モデル 傾圧波動 北極振動 半年周期振動

## 1. 研究開始当初の背景

気候モデルをベースにして、火星大気研究の為に大気モデルを作成した。モデルに導入した物理過程は、火星大気の凝結昇華過程で、火星大気の主成分である二酸化炭素の凝結

昇華等に伴う潜熱・顕熱のやり取りと、極域での二酸化炭素氷床の生成である。また、火星大気では、大気の主成分である二酸化炭素の近赤外波長域での放射効果も無視できないために、その効果も計算している。さらに、

ダストの放射過程は火星大気の温度構造を決定づける必要不可欠な要素であるため、そのダストの散乱・吸収過程を導入した。

## 2. 研究の目的

火星ダストの巻き上げ、およびダストの輸送を陽に表現する大気モデルを作成し、ダストストームの発生過程に関しての問題を考察する。一方、ダスト分布を外から与える既存のモデルを用いて、大気力学的な問題（ここでは傾圧波動、北極振動、半年周期振動）を研究する。

## 3. 研究の方法

大気大循環モデルにダスト巻き上げのスキームを導入し、モデル結果と実際のグローバルダストストーム現象の解析結果を比較しながら、モデル再現性の比較検証研究をおこなう。

一方、これまで作成してきた既存のモデル (Kuroda et al., 2005, JMSJ) を用い、火星大気中に生起する様々な現象と比較しながら、モデルの再現性および新しい力学メカニズムの発見をおこなう。

## 4. 研究成果

(1) 地表から大気中へのダスト巻き上げ過程をパラメタリゼーションとしてモデルに導入した。地表付近の風応力に依るダスト粒子巻き上げと、地表付近の対流活動に依るダスト粒子巻き上げの2つである。

ダスト巻き上げは地表付近の風応力に依存する。評価した風応力を用いて、地表でのダストフラックス  $F_{WSL}$  を評価し、

$$F_{WSL} = \alpha_{WSL} \times 2.61 \frac{\tau^{3/2}}{g\sqrt{\rho}} (1 - \sqrt{\frac{\tau^*}{\tau}}) (1 + \sqrt{\frac{\tau^*}{\tau}})^2$$

とパラメタ化する。ここで、 $\rho$  は地表大気密度、 $g$  は重力加速度、 $\tau^*$  は観測に整合的な光学的厚さを得られるように、

$\alpha_{WSL} = 2.0 \times 10^{-7}$  とした。また実験設定と

して、風応力の閾値である  $\tau^*$  を  $5.0 \times 10^{-2} Nm^{-2}$  とした。

衛星及び地上観測からダストデビルと呼ばれる砂塵旋風の存在が確認されている。水平スケールは数百 m、鉛直スケールは数 km とダストストームのそれと比べて非常に小さい対流現象を反映している。季節を問わずその発生が確認されているため、火星大気中のダストの循環を考える上で無視できない。本研究では背景場のダストを再現するために、この対流に伴うダストの巻き上げも考慮した。ダストデビルの活動度  $\Lambda$  とモデルの地表面顕熱フラックス  $F_s$  が線形の関係であると仮定する、

$$\Lambda = \eta F_s$$

ここで  $\eta$  は熱効率である。  $\Lambda$  はダストデビルの高さの関数で、

$$\eta = 1 - \frac{p_s^{\chi+1} + p_{top}^{\chi+1}}{(p_s - p_{top})(\chi + 1)p_s^{\chi}}$$

とする。  $p_s$  は地表面気圧、  $p_{top}$  はダストデビル top の気圧、  $\chi$  は火星の気体定数と定圧比熱の比を示す。ダストデビルの発生に伴うダストフラックス  $F_{DDA}$  はダストデビルの活動度に比例するとして

$$F_{DDA} = \alpha_{DDA} \times \Lambda$$

の式で与える。ここで、  $\alpha_{DDA}$  は背景場のダストを適切に再現するためのパラメタであり、本研究では  $\alpha_{DDA} = 1.0 \times 10^{-9}$  とした。地表面に極冠が生成されている場合は、ダスト巻き上げはないとする。

数値実験で用いたモデル (T21) の格子点数は東西 64 点、南北 32 点、鉛直方向 30 点である。水平方向の格子間隔は約 333km、モデル最上層の高度は約 80km である。Mars Global Surveyor で得られた MY24 の観測結果を初期条件として与えた。実験は南半球春分 (Ls=180) から開始した。以下の結果は同年の南半球夏至 (Ls=270) である。なお、スピンアップに要する時間は 5 火星日未満と短い。

(2) 南半球夏至付近でダストの強い巻き上げが見られた(図1)。これは過去の観測で分かっているダストストームの発生時期と一致する。地表から大気中へ巻き上げられたダストは2火星日程度で高度80km(0.01mb)にまで達した。

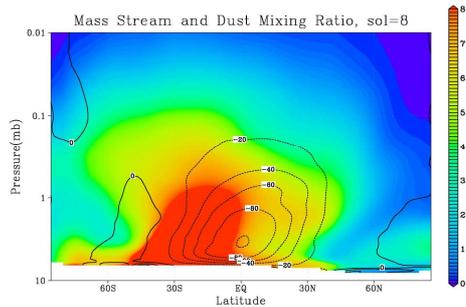


図1 ダストの質量混合比(コンター)と質量流線関数(ライン)。巻き上げ発生から8日目。

風応力によるダスト巻き上げの地域(水平分布)を図2に示す。30S付近でダストの巻き上げが盛んに見られる。特に0~90Eの山岳地帯の斜面南側では地表風速が30m/secと非常に大きい値となっており、ダストの巻き上げが顕著である。一方で過去にダストストームが発生したヘラス盆地(南半球120W付近)での強いダストの巻き上げは見られなかった。その時の、帯状平均した温度と風の分布を図3に示す。0.1mb高度付近で約190K(90S-60N)、地表付近の温度も60Sで235K程度となっている。これらの結果は2001年の全球ダストストーム(発生は南半球春分)と比べると5~10K程低い値となっているが、ダスト巻き上げを自然に発生させたモデルとしては、比較的現実的な結果が得られた。

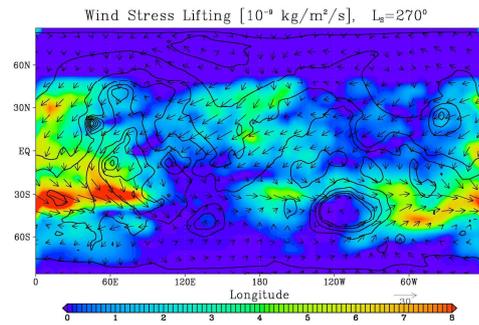


図2 地表面の巻き上げダストフラックス、図は大規模な巻き上げが発生してから2火星日後を示す、矢羽根は地表面の風。

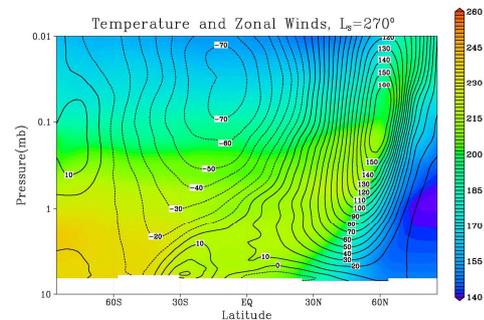


図3 帯状平均した温度(コンター、白ライン)と風(黒ライン)。

現在、本研究で用いている火星大気モデルで全球ダストストームへの自然な遷移を再現するまでには至っていない。火星環境下ではモデルで表現できるスケールよりも小さな局地循環や対流が存在しており、ダストの巻き上げに強く影響していると考えられている。こうした局所的な風の表現は、この分解能のモデルでは十分であるとは言えない。ダストの循環を表現するにはダストの巻き上げに寄与するサブグリッドスケールの風を検討する必要がある。また、より細かい分解能のモデルを利用する方法もある。

(3) 自動的ダスト巻き上げのモデル作成の一方で、既存のモデルを用いて、火星大気

力学プロセスについていくつかの研究をおこなった。大気中のダスト量の違いによる傾圧波動の振る舞いの違いを研究した (Kuroda et al., 2007, GRL)。中緯度に存在する、地球大気と類似の大規模スケールの擾乱 (傾圧波動) が、グローバルダストストームがある時とない時で、大気の安定度および平均東西風が異なるために、その中に存在すると考えられる大気擾乱の振る舞いが異なることを示した。グローバルダストストームがないときは、傾圧波動としては波数 1 の波動が卓越している。このモデル結果は理論的考察と整合的である。一方、グローバルダストストームが存在するような状況では、大気がより安定となり、また中緯度帯の平均東西風が弱い状況になっている。その中の傾圧波動擾乱のスケールが小さい擾乱が卓越し、また擾乱の振幅は小さかった。これはより大気が安定であり、東西風が弱く傾圧性が小さい大気状況の理論的結論と整合性のある結果である。

(4) 火星大気の北極振動についての研究をおこなった (Yamashita et al., 2007, GRL)。地球大気でよく現れる冬季の北極振動が火星大気に現れることを確認し、その特性が地球大気のものとは異なるものであることを示した。1つの特性として、火星大気は慣性が小さいために、火星大気の極振動の周期が短く、地球大気のものよりはやく振動することが分かった。その北極振動に対して、傾圧波動による運動量輸送が重要な役割を果たしており、この状況は地球大気の極振動とは異なることを示した。

(5) 熱帯域成層圏に存在する半年周期振動についての研究をおこなった (Kuroda et al., 2008, GRL)。大気潮汐波動の衛星観測による温度データの振幅を調べ、大気潮汐の振幅が半年振動していることを、初めて解析に

より実証した。さらにモデルを用いて、その半年振動がどのような力学プロセスで作られているかを調べるため、詳細な波動の解析をおこなった。半年周期振動への大気潮汐の重要性を指摘し、この結果は地球大気の半年振動とは大きく異なることを示した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

1. Takeshi Kuroda, Alexander S. Medvedev, Paul Hartogh and Masaaki Takahashi, Semiannual oscillations in the atmosphere of Mars, *Geophysical Research Letters*, 35, L23202, doi:10.1029/2008GL036061, 2008, 査読有り

2. Takeshi Kuroda, Alexander S. Medvedev, Paul Hartogh and Masaaki Takahashi, Seasonal changes of the baroclinic wave activity in the northern hemisphere of Mars simulated with a GCM, *Geophysical Research Letters*, 34, L09203, doi:10.1029/2006GL028816, 2007, 査読有り

3. Yamashita, Y., T. Kuroda and M. Takahashi, Maintenance of zonal wind variability associated with the annular mode on Mars, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L16819, doi:10.1029/2007GL030069., 2007, 査読有り

[学会発表](計 12 件)

1. Alexander S. Medvedev, Takeshi Kuroda, Paul Hartogh, Masaaki Takahashi, Semiannual oscillations in the atmosphere of Mars, Third International Workshop on the Mars Atmosphere: Modeling and Observations, #9047, Williamsburg Woodlands Hotel and Conference Center,

Williamsburg, VA, USA, November 2008

(Oral)

2. Takeshi Kuroda, Paul Hartogh, Daisuke Sakai, Masaaki Takahashi,

Simulation of the water cycle on Mars in the CCSR/NIES/FRCGC MGCM, Third International Workshop on the Mars Atmosphere: Modeling and Observations, #9049, Williamsburg Woodlands Hotel and Conference Center, Williamsburg, VA, USA, November 2008

(Oral)

3. Takeshi Kuroda, Paul Hartogh, Daisuke Sakai, Masaaki Takahashi, Simulation of

the water cycle on Mars in the CCSR/NIES/FRCGC MGCM, 37<sup>th</sup> COSPAR Scientific Assembly, C34 -0013 -08, le Palais des congres, Montreal, Canada, July 2008 (Poster)

4. Takeshi Kuroda, Alexander S. Medvedev, Paul Hartogh, Masaaki Takahashi, Study of the semiannual oscillations in the Martian atmosphere with a general circulation model, AOGS 2008, PS12 -A014, BEXCO

Convention Center, Busan, Korea, June 2008 (Oral)

5. Alexander S. Medvedev, Takeshi Kuroda, Paul Hartogh and Masaaki Takahashi, Semiannual oscillations in the atmosphere of Mars, AGU 2008 Joint Assembly, P34A -04, Greater Fort Lauderdale -Broward County Convention Center, Fort Lauderdale, FL, USA, May 2008 (Oral)

6. Takeshi Kuroda, Daisuke Sakai, Masaaki Takahashi, Alexander S. Medvedev, Paul Hartogh, First results of the water cycle simulation in CCSR/NIES MGCM, Mars Water Cycle Workshop, Museum National d'Histoire Naturelle, Paris, France, April 2008

(Oral)

7. Takeshi Kuroda, Alexander S. Medvedev, Paul Hartogh and Masaaki Takahashi,

Semi-annual oscillation in the atmosphere of Mars: a study with a general circulation model, European Planetary Science Congress 2007, EPSC2007 -A -00204, Kongress Hotel am Templiner See, Potsdam, Germany, August 2007 (Oral)

8. Takeshi Kuroda, Alexander S. Medvedev, Paul Hartogh and Masaaki Takahashi,

Seasonal changes of the baroclinic wave activity in the northern hemisphere of Mars simulated with a General Circulation Model, IUGG XXIV General Assembly, 5341, Perugia, Italy, July 2007 (Oral)

9. 門脇正尚・高橋正明, 火星大気大循環モデルを用いた火星砂嵐の再現実験, 日本地球惑星科学連合2007年大会, 2007年5月

10. 門脇正尚・高橋正明, 火星大気大循環モデルを用いた火星砂嵐の再現実験報告, 第21回大気圏シンポジウム, 2007年2月

11. Takeshi Kuroda, Alexander S. Medvedev, Paul Hartogh and Masaaki Takahashi, Simulation of transient waves in the Martian atmosphere using general circulation models, The 36th COSPAR Science Assembly, C3.1 -0032 -06, Beijing Institute of Technology, China, July 2006 (Poster)

12. 山下陽介・高橋正明, 火星大気の北極振動とそれに関する波の活動及び外部強制力 ~ 地球大気の北極振動と比較して ~ , 2006年度日本気象学会春季大会, 2006年5月

{ その他 }

なし

6 . 研究組織

(1)研究代表者  
高橋 正明

(2)研究分担者  
なし

(3)連携研究者  
なし

(4)研究協力者

黒田 剛史(KURODA TAKESHI)

宇宙航空研究開発機構・日本学術振興会特別  
研究員

門脇 正尚(KADOWAKI MASANAO)

東京大学・気候システム研究センター・大学  
ター・大学院生

山下 陽介(YAMASHITA YOUSUKE)

東京大学・気候システム研究セン  
ター・大学院生